

# モデルに基づく柔軟物体のロバストな操り

○和田隆広<sup>†</sup> 森宏滋<sup>‡</sup> 古池伸好<sup>‡</sup> 平井慎一<sup>‡</sup> 川村貞夫<sup>‡</sup>  
<sup>†</sup> 香川大学 工学部, <sup>‡</sup> 立命館大学 ロボティクス学科

## Robust Manipulation of Deformable Objects Using A Model Based Technique

\*Takahiro Wada<sup>†</sup>, Hiroshige Mori<sup>‡</sup>, Nobuyoshi Koike<sup>‡</sup>,  
 Shinichi Hirai<sup>‡</sup>, and Sadao Kawamura<sup>‡</sup>  
<sup>†</sup> Kagawa University, <sup>‡</sup> Ritsumeikan University

**Abstract**— We discuss on the manipulation of deformable objects is presented. The manipulation is a primitive task in garment industry, food industry and so on. It is difficult to realize these tasks by mechanical systems due to their complex deformation characteristics. In this paper, we will realize manipulation of deformable objects using robust control method based on their coarse model with a visual sensor.

**Key Words:** deformable objects, manipulation, visual sensor, control

### 1. はじめに

柔軟物の操りは、衣料産業や食品産業など幅広い分野における基本的な作業である。しかし、対象物体の変形特性の多様さにより、機械システムによる実現は難しいのが現状である。

これまで、視覚センサを用いることによって、粗いモデルに基づく多入力多出力の制御が可能であることが示された<sup>1)</sup>。本研究では、従来より提案している繰り返し制御則をそのまま柔軟物の圧縮変形へ応用し、その問題点を明らかにする。さらに、その問題点を解決するため、新しい実用的なフィードバック制御則を提案する。

### 2. 柔軟物の操り

柔軟物の操りとは、物体の位置・姿勢と変形の両方を同時に制御することである。実際の柔軟物の操りでは、対象物体に変形が生じるため、点接触ではなく、面接触が生じる。また、指と対象物体との相対位置が、すべりや転がりのため、変化することが多い。

対象物体の並進、回転、変形を表現するために、対象物体上に有限個の位置決め点を選ぶ。このとき柔軟物の操りは、Fig.1の示すように、位置決め点をそれぞれの目標点に案内することとみなすことができる。

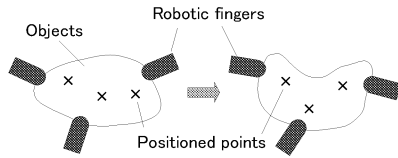


Fig.1 Manipulation of deformable objects

### 3. モデルに基づく繰り返し制御則

柔軟物の操りでは、指は物体と面接触する。指と物体の接触面内の一点を操作点とする。このとき、Fig.2に示すように、操作点、位置決め点を通るように、対象物体上に格子を設ける。各格子点間をバネで結合して、物体の弾性変形をモデル化する。

結局、格子点は以下の3種類に分類される。

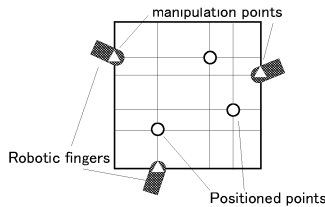


Fig.2 Lattice model of deformable objects

**操作点:** ロボット指で拘束を与える点。

**位置決め点:** 操作点を適切に制御することにより位置決めする点。

**非対象点:** 操作点でも、位置決め点でもない点。

操作点、位置決め点、非対象点の数をそれぞれ、 $m, p, n$ , とする。ただし、操作点の数と位置決め点の数は等しい( $m = p$ )とする。また、すべての操作点の  $x, y$  座標を並べた  $2m$  次元ベクトル  $r_m$  を定義する。同様に、位置決め点、操作点に対し、それぞれ  $r_p, r_n$  を定義する。

ここで、各格子点における釣り合いの式を線形化すると、次式を得る<sup>1)</sup>。

$$\delta A \delta r_m + G[\delta r_n^T, \delta r_p^T]^T = 0 \quad (1)$$

これを参考にし、次の制御則が導かれる<sup>1)</sup>。

$$r_m^{k+1} = r_m^k - d(S_L G_k^{-1} A_k)^{-1}(r_p^d - r_p^k) \quad (2)$$

$$r_n^{k+1} = r_n^k - dS_U G_k^{-1} A_k(r_m^k - r_m^{k-1}) \quad (3)$$

ただし、 $S_U = [I|0], S_L = [0|I]$  である。 $r_p^d - r_p^k$  は目標値との誤差。 $r_m^k$  は操作点の位置である。添字  $k$  は、 $k$  回目の試行を表し、 $d$  はモデル化誤差が生じて安定化するように用いたスケーリングファクターである。行列  $G_k, C_k$  は、 $r_m^k, r_p^k$ , および  $r_n^k$  の関数となる。

第  $k$  回の試行において、視覚センサにより位置決め点の位置を計測する。式(1)により、位置決め点の誤差を減少させるための、操作点変位を決定する。ロボット指を制御して、操作点の位置をこれに一致させる。その後、 $k+1$  回目の位置決め点の誤差を再び計測する。この手順を繰り返すことにより、位置決め点が目標値へ収束される。ただし、非対象点  $r_n^k$  に関しては、数が多いために視覚センサによる計測が効果的でない場合が多いので、式(2)で推定する。

この制御則では、指と対象物がすべったり、離れたりするのを防ぐ事を考慮していない。そのため、作業中に指と対象物がすべらない等の保証はない。ここでは、この制御則でどの程度の作業まで対応できるかを調べるため、そのまま操りへ適用する。

### 4. 実験

#### 4.1 実験手法

本節では、実際の柔軟物体を用いて操りを行い、提案する手法の有効性を示す。対象物体として、ポリエーテルフォームのスポンジを  $90[\text{mm}] \times 90[\text{mm}] \times 30[\text{mm}]$  に切り取って使用した。ただし、今回は、2次元平面内での変形を扱うため、厚さ方向は無視する。Fig.3のように位置決め点、操作点を3点ずつ、次式の通り配置した。 $r_p = [30, 30, 60, 30, 60, 60]^T$ ,  $r_m = [60, 0, 0, 30, 90, 60]^T$

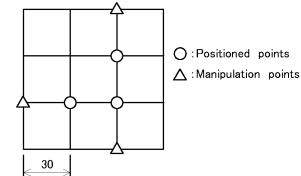


Fig.3 Location of positioned & manipulation points

Fig.4のように6パターンに分け実験を行う。パターン1は並進のみ、パターン2は並進しながらの圧縮、パターン3は並進しながらの伸長、変形パターン4は回転、パターン5は圧縮、パターン6はパターン1の並進とパターン4の回転の組み合わせである。目標値はそれぞれ以下の通りである。

$$\text{パターン1: } r_p^d = [35, 30, 65, 30, 65, 60]^T$$

$$\text{パターン2: } r_p^d = [35, 30, 62, 30, 62, 60]^T$$

$$\text{パターン3: } r_p^d = [32, 30, 65, 30, 65, 60]^T$$

パターン4:  $r_p^d = [27.6, 32.8, 57.2, 27.6, 62.4, 57.2]^T$

パターン5:  $r_p^d = [32, 32, 58, 32, 58, 58]^T$

パターン6:  $r_p^d = [32.6, 37.8, 62.2, 32.6, 67.4, 62.2]^T$

#### 4.2 実験結果

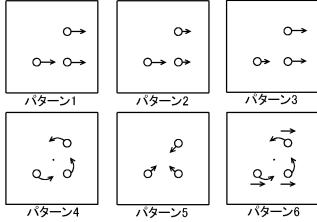


Fig.4 Motion pattern of positioned points

Table 1 Convergence of norm

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
パターン1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	9	4	10	3	4	4	5	5	4
	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
パターン2	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	4	16	16	16	16	16	16	16	16	12
	3	4	4	4	3	4	3	3	4	4
パターン3	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
パターン4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	4	3	4	9	4	9	4	4	7	4
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
パターン5	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3
パターン6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	9	4	7	8	6	14	10	4	8	8
	4	4	4	4	4	5	5	5	4	4

実験結果をTable1に示す。操りが成功したか否かを、位置決め点誤差のユークリッドノルム $\epsilon$ が、あるしきい値 $\epsilon_t$ より小さくなったか否かで判定する。Table1の各パターン1段目は、○:  $\epsilon_t = 1.0$ で収束、△:  $\epsilon_t = 2.0$ で収束、×: 収束なし、を表し、2段目、3段目はそれぞれ $\epsilon_t = 1.0, \epsilon_t = 2.0$ のときの収束回数である。Fig. 5 (a),(b)はそれぞれ変形,回転の代表的な例の運動を表す。

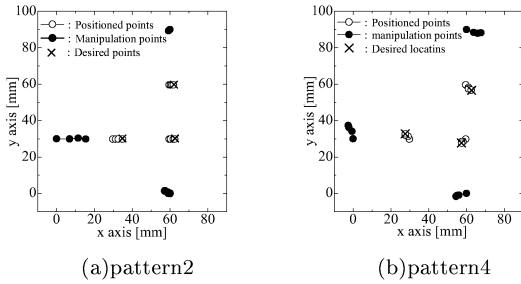


Fig.5 Measured motion of positioned points and manipulation points

4.3 考察 今回の実験では、Table1に示すように、パターン1,4,6のような変形を含まない操りに関しては、 $\epsilon_t = 1.0$ で収束している。一方、変形を含む操りに関しては、 $\epsilon_t = 2.0$ で収束した。これは、視覚センサの分解能が0.72mmであること、ならびに、操作点の配置が不適切であったことが原因であると考えられる。

式(2)の制御則をそのまま用いた結果、目標値によっては対象物との把持が崩れやすくなる。そのため、安定に把持した状態で操りを行う必要がある。他方、式(2)の繰り返し制御則では、視覚情報を離散的にしか利用できないため、安定把持制御には不適切である。つまり、リアルタイムに連続的に視覚情報をフィードバックする制御が適切である。これについては次節で検討を行う。

### 5. フィードバック制御則

式(2)の繰り返し制御則の問題点を解決するための新しい制御則を提案する。ここで提案する制御則は次の通りである。物体の微小変位が式(1)で支配されているとする。式(1)を変形し次式を得る。

$$\dot{r}_p = J(r)\dot{r}_m \quad (4)$$

ここに、 $J = -S_L G^{-1} A$ とおいた。なお、物体の質量や粘性等を無視したため、対象物の変形が弾性変形のみとなる。このとき位置決め点と操作点の位置関係は釣り合い方程式で表現される拘束条件を受ける。その際、微分関係が式(4)で表されるため、仮想仕事の原理より、次のフィードバック制御則が導かれる。

$$u = -\hat{J}^T K_P (r_p - r_p^d) - \dot{r}_m - \hat{J}^T K_I \int (r_p - r_p^d) d\tau \quad (5)$$

ただし、 $\hat{J}$ は、誤差を含んだ $J$ である。また、この制御則において、ロボット側は無視して書いている。式(5)は、Cheah<sup>2)</sup>らの近似ヤコビ行列によるマニピュレータ制御と同様になる。

式(5)を変形し、柔軟物のモデルを全く用いず、次式で制御則を構成することも考えられる。

$$u = -K_P (r_p - r_p^d) - \dot{r}_m - K_I \int (r_p - r_p^d) d\tau \quad (6)$$

つまり、 $\hat{J} = I$ とおいた。一般にマニピュレータの場合、ヤコビ行列は姿勢により極端に変化する。しかしながら、柔軟物における行列 $J$ は $r_m$ および $r_p$ の要素に入る点の位置にもよるが、変形が大きい場合、その変化が少ない。この性質を利用すれば、式(6)のようにモデルを全く用いない柔軟物制御が可能となる。次節に、この制御則の有効性を示すシミュレーション結果を示す。

### 6. シミュレーション結果

本節では、式(6)の有効性を示すために行ったシミュレーション結果を示す。Fig.6に示すように柔軟物に対し、位置決め点、操作点を配置する。目標値としては、回転させながら縦方向へ引っ張るような変形を与えるものを選んだ。つまり、 $r_p^d = [10, 25, 35, 35, 20, 60]^T$ とした。この作業を、式(6)を用いて実現する。紙面の都合上シミュレーション詳細の説明は省略する。

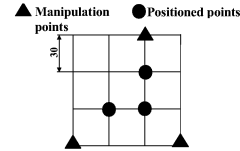


Fig.6 Configurations of points

Fig.7に、誤差ノルムの収束の様子を示す。Fig.8に、その際の各点の挙動を示す。

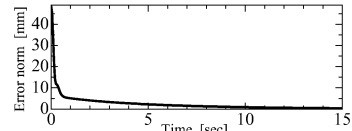


Fig.7 Error norm of control results

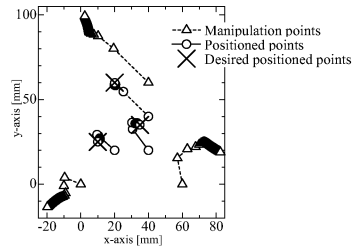


Fig.8 Behavior of Manipulation and Positioned Points

これらより、モデルを用いなくとも、柔軟物の操りが容易に実現できることがわかる。

### 7. おわりに

本研究では、柔軟物の操りを有限個の代表点の運動で表すことを提案した。その際に、視覚センサを用いた粗いモデルに基づくロバストな制御則が適用できることが示された。さらに、実験によりその有効性を確認した。

ただし、問題点として、対象物の安定把持の困難さが挙げられた。その問題を解決することを目的とし、新しいフィードバック制御則を導出した。さらにシミュレーション結果により、モデルを用いることなく、柔軟物体の操りが可能であることを示唆した。今後、どの程度の変形、対象物まで対応出来るのか、理論的に考察したい。

### 参考文献

- 1) 和田隆広, 平井慎一, 川村貞夫, “伸縮柔軟物体上の複数点の間接的同時位置決め作業の実現,” 日本ロボット学会誌, vol.17,no.2,pp.126-134,1999.
- 2) C.C.Cheah,S.Kawamura,S.Arimoto,K.Lee,”PID Control of Robotic Manipulator with Uncertain Jacobian Matrix”,Proc. ICRA'99, pp.494-499,1999